第 40 卷　第 2 期
2023 年 4 月

应　用　力　学　学　报
Chinese Journal of Applied Mechanics

Vol. 40 No. 2
Apr. 2023

文章编号:1000-4939(2023)02-0459-15





顾耀东,宁波大学体育学院教授/博导,中国残疾人体育发展专业委员会副主任委员、中国体育科学学会运动生物力学分会常委、新西兰奥克兰大学荣誉教授、安踏(中国)有限公司运动生物力学顾问,主导成立中国-中东欧大学体育教育与研究联盟。

主要从事运动生物力学与竞技运动表现提升相关研究,在国内外高水平期刊发表 200 余篇研究论文,出版学术专著 3 部,授权转化发明专利 5 项。主持国家重点研发计划子课题、国家自然科学基金项目、浙江省重点研发计划、浙江省杰出青年基金等 6 项。担任 Scopus 收录期刊 *Physical Activity and Health*,*EI* 收录期刊 *International Journal of Biomedical Engineering and Technology* 主编,《中国体育科技》《医用生物力学》、*Sports Biomechanics* 等期刊编委。入选浙江省高校领军人才、宁波市领军与拔尖人才工程第一层次。

流体力学视角下竞技游泳动力学研究进展

徐异宁,孙冬,李蜀东,顾耀东

(宁波大学体育学院,315211 宁波)

摘　要:竞技游泳的动力学研究对游泳动作技术优化和运动表现提升具有重要意义,但一直以来受制于流体运动量化技术发展的限制。本研究旨在对流体力学视角下的竞技游泳动力学相关进展及发展历程进行系统梳理,深入探讨流体力学研究方法和技术进步对游泳动力学量化研究的贡献。该综述通过检索 Web of Science、PubMed、Scopus、Google Scholar、中国知网(CNKI)等数据库,根据所检文献标题筛选相关文献,并对文献的出版信息、研究目的、方法、结果和结论进行提取、归纳、分析和总结。长久以来,游泳的流体力学分析受到流体运动量化技术和研究手段的制约,目前依然存在大量难以测量和预测的物理量。近年来,随着流体力学研究技术和设备的更新与发展,游泳推进的动力学机制已有多种假说被提出,包括升力和阻力机制假说、涡旋能量机制假说和轴向流(射流)机制假说。同时,泳者在游泳时所受到的各种作用力及作用力之间的相互作用也得到了更精确的量化。目前而言,游泳流体力学研究进展和人体运动生物力学研究前沿相比,仍有较大差距,两者

收稿日期:2022-08-31　　**修回日期:**2022-10-09
基金项目:浙江省重点研发计划资助项目(No. 2021C03130);浙江省杰出青年科学基金资助项目(No. LR22A020002);宁波市重点研发计划资助项目(No. 20222ZDYF020016);宁波市公益类科技计划资助项目(No. 2021S134)
通信作者:顾耀东,教授,博士生导师。E-mail:guyaodong@nbu.edu.cn
引用格式:徐异宁,孙冬,李蜀东,等. 流体力学视角下竞技游泳动力学研究进展[J]. 应用力学学报,2023,40(2):459-473.
XU Yining,SUN Dong,LI Shudong,et al. Progress of swimming dynamic research from a hydromechanical perspective[J]. Chinese journal of applied mechanics,2023,40(2):459-473.

结合深度依然不足。未来研究应聚焦流场可视化技术应用下的游泳流体力学量化分析,将流体力学研究前沿与人体运动生物力学实践相结合,科技助力泳者优化技术,提升运动表现。

关键词:竞技游泳;流体力学;运动生物力学;动力学;流场分析

中图分类号:G804.6 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2023.02.024

Progress of swimming dynamic research from a hydromechanical perspective

XU Yining, SUN Dong, LI Shudong, GU Yaodong

(Faculty of Sports Science, Ningbo University, 315211 Ningbo, China)

Abstract: The studies of biomechanics in swimming have played an important role in the optimization of swimmers' skills and the improvement of their performance. This narrative review aims to retrospect the relevant knowledge and history of swimming kinetics and dynamics from a hydromechanical perspective, carrying out a comprehensive discussion on the contribution provided by the technology advances in hydromechanical studies to the field of swimming biomechanical quantitative research. A comprehensive, reproducible search strategy had been performed on the databases of Web of Science, PubMed, Scopus, and Google Scholar. The eligible studies were screened out according to their titles. Basic publication information, objectives, methods, results, and conclusions of the eligible studies were extracted and summarized. For a long time, the large number of physical quantities which are difficult to predict and measure in fluid motion limited the development of hydromechanical analysis of swimming. With the development of technology for flow motion visualization and quantization over the decades, several hypotheses have been proposed for the propulsion mechanism of human swimming, which are propulsions from lift and drag, vortices, and axial flow. At the same time, the resistance that the swimmers loaded during swimming has been quantified accurately. At present, there is still a gap in the research progress of swimming hydromechanics compared with the research frontier of sports biomechanics, and the combination of them is still insufficient. Future studies should focus on quantitative analysis of swimming hydromechanics and integrate its results more closely with sports biomechanics to help swimmers optimize skills and improve their performance.

Key words: swimming; hydromechanics; sports biomechanics; dynamic; flow field analysis

竞技游泳(以下简称游泳)运动发生在两种不同的介质(空气与水)中,涉及人体、水、和空气三者之间的相互作用。同时,空气和水的运动状态也十分不稳定,其物理性质的特殊性(如水对光线的折射)也给研究中的相关参数的测量带来了一定困难。所以,在游泳的运动生物力学和流体力学研究中,依然存在许多物理量难以测量和预测,导致许多问题依旧悬而未决[1]。研究表明,在游泳过程中,泳者身体周围的流场会随着泳者游泳的周期性动作而周期性变化,非常复杂。而泳者在水中受到的力与其周围流场,特别是流场中涡流的产生、发展、剥离直接相关。因此,游泳的流体力学研究对于泳者的技术动作优化和运动表现的提升具有非常重要的意义[2],游泳的流体力学研究可以对泳者在游泳过程中身体周围流体作用力分布特征做出定性的分析,为改进游泳技术动作提供科学依据,同时为游泳减阻措施的创新以及效果评价提供科学依据。

随着研究技术和设备的更新迭代,游泳的流体力学研究已经从定性分析发展到了二维层面实时反馈的简易定量分析,目前,正朝着三维层面定性分析发展,并逐步迈向三维层面可实时反馈的复杂定量分析。

早期,流体力学视角下的竞技游泳动力学研究普遍基于定常流环境假设,有关分析也大多为定性分析,如COUNSILMAN等于1970年提出了利用升力效应的游泳推进机制。然而,现实情况下,游泳是在非定常流环境下进行的,而基于定常流假设的研究结论中仅有少部分能迁移到非定常流环境。大多

数情况中,定常流和非定常流的流体力学特性差异较大,比如非定常流中试验所测得的升力远大于定常流体假设下的计算结果。

近年来,游泳运动员和教练员们逐渐形成共识,顶级的游泳技术意味着利用水流给自身创造流体动力学优势,即好的“水性”[3-4]。MATSUUCHI 等[5]于 2004 年的研究利用 PIV 技术分析了自由泳(爬泳)划水过程中的非定常流场特性,发现高水平泳者的划水动作可以利用延迟失速效应形成更大的涡旋,以利用更大的涡间射流推进身体。2007 年,MATSUUCHI 等[6]的另一项研究对比了不同水平游泳运动员手部划水动作和动作所产生的涡旋的关系,发现高水平泳者手部的划水动作和其所产生的涡旋相关,而游泳初学者中这种相关性并不显著。同时,高水平泳者通过手部划水动作改变了水流方向,产生一个卡门涡旋和一个反向剥离涡旋,并从涡间射流中获得推进力。

2000 年之后,随计算流体力学(computational fluid dynamics,CFD)及其仿真技术的快速发展和应用,游泳的流体动力学研究有了长足的进步。同时,有限元分析方法(finite element method,FEM)与体育科学的结合也日益紧密。比如,ROUBOA 等[7]的研究通过改进后的三维数据采集技术和数字化软件扫描游泳运动员的四肢,将泳者的人体测量学数据和力学数据结合,更好地估计了游泳过程中产生的各种作用力。与此同时,李天赠等[8]和张晓侠等[9]的文献述评,均认为 CFD 仿真技术可以较好地解释游泳运动技术相关的流体科学性问题,避免了试验研究成本高、操作复杂、可重复性低的局限性,并通过综合分析、归纳了近几十年来基于计算流体力学的游泳动态数值模拟研究进展,指出不同研究方法的特点和局限性,探讨了未来研究的发展趋势。两篇述评均指出,游泳动态运动的模拟仿真是计算机模拟技术工程应用中最具挑战性的问题之一,虽然近 10 多年来数值模拟方法在游泳运动中的应用得到了较快的发展,但从研究的现状来看,目前的研究方法还存在着一定的局限性。例如,目前应用于人体和流体交界面的网格划分方法尚无法满足对高度复杂的游泳技术动作的数值模拟要求;同时,对复杂游泳动态运动数值模拟结果的验证资料较为匮乏,已有的测试数据未能有效支撑当前计算方法的可靠性;最后,CFD 运用于游泳运动的最优模型建立、网格划分、以及“流固双向耦合”分析技术等领域,均还存在较大的提升空间。因此,需要未来的研究去进行进一步的探索[8-9]。

综上,虽然该领域的相关研究已有多年历史,但一直以来受制于流体运动量化技术发展的限制。本述评对流体力学视角下游泳动力学相关研究及其发展历程进行了简单梳理,并初步展望了未来研究基于研究方法和技术的进步,所能提供的日益增强的分析能力。

1　方　法

1.1　文献资料来源

本综述的文献资料来源为 Web of Science、PubMed、Scopus、Google Scholar、以及“中国知网(CNKI)”的国内外期刊论文、出版书籍、硕士及博士毕业论文数据库。为了保证检索的全面性,重点资料的参考文献列表也同时作为本综述的文献资料来源,避免遗漏可能符合纳入标准的相关文献。

1.2　文献检索策略

本综述检索以“游泳(swimming)”作为主要检索词,以“流体力学(hydromechanics)”、“动力学(dynamic)”或“流场(flow)”作为次要检索词,次要检索词之间的逻辑关联词为“或(or)”,主要检索词和次要检索词之间的逻辑关联词为“和(and)”。检索语言为中文或英文,发表日期截至 2022 年 6 月。

1.3　文献纳入标准

本综述的文献纳入标准为:①研究对象为健全游泳运动员;②针对国际泳联(FINA)2017 年 9 月 21 日生效的《FINA 游泳规则》中所规定的室内以竞速为目的的竞技游泳项目[10];③动力学相关定量研究,研究过程包括数据测试和量化分析,并提供可量化的结局指标;④优先纳入 2000 年后的相关研究文献。

1.4　文献排除标准

本综述的排除标准为:①以残疾人为研究对象的文献;②针对公开水域游泳、花样游泳、水球、跳水、潜水等水上运动项目的研究;③非动力学相关研究;④定性研究,无数据测量和量化分析,或结局指标无法量化。

1.5 信息总结方法

本综述根据所检文献标题对相关文献进行二次筛选,并对最终所纳入文献中的出版信息、研究目的、方法、结果和结论进行提取、归纳、分析和总结。

2 游泳的推进机制

游泳的推进机制一直是游泳动力学研究领域的热点。在过去的几十年里,学界已经提出了若干人类游泳的可能推进机制。

2.1 升力和阻力机制假说

20世纪的早期研究初步揭示了泳者在水下所受到游动方向上的力(阻力,drag force)和垂直于游泳方向上的力(升力,lift force)之间的相互作用。上世纪60年代末,COUNSILMAN等借鉴了空气动力学中的伯努利方程(Bernoulli Principle)来解释泳者手部在水中的划水路径呈曲线状的原因,并提出,泳者在划水动作中,手部的划水路径为曲线型,并通过不断调整手的俯仰角度,使其在水中受到的升力能在游泳前进方向上产生一个较强的分力,即推进力。

但是,现在学界普遍认为伯努利方程对游泳中的推进机制的解释是不恰当的。根据牛顿运动定律,推进力可以通过加速一个和游向相反的水团来获得。在这种推进机制假设中,阻力分力和升力分力的大小取决于流体的密度,四肢相对于流体的速度,肢体的表面积,和当时运动状态下的阻力系数与升力系数。之后的研究使用了特制的游泳水槽(水槽内能提供流速可控的水流),并在水槽内浸入手和前臂的模型,估算手在不同姿态和方向下的阻力和升力系数[7,11-12],并通过将升力和阻力系数与通过数码摄像技术所获取的手部运动速度和方向数据相结合,估计升力和阻力的大小[13]。这些研究观察到,在游泳过程中手臂划水时,手的实际俯仰角度处于使阻力最大化的角度范围,而不是处于使升力最大化的角度范围。因此推断,在自由泳(爬泳)、仰泳和蝶泳的推进阶段,阻力占绝对支配性地位[14]。

然而,手部的曲线轨迹或方向变化也可以提供一定的动力学优势[15]。根据牛顿运动学,若泳者顺水而游,水流和身体同向运动,相比于在静水环境下,泳者身体和水流的相对速度更小。因此,即便手部相对于外部参照系以同样的速度和方向运动,其产生的推进力仍然会减弱。不难推断,如果在整个划水动作的周期中,控制手的方向,让泳者“找到水的相对静止点”,就可以在较长一段时间内对大量的水团进行“加速”。

先前的研究发现,最大升力系数(约0.8~1.0)会在攻角为35°~45°时获得,而最大阻力系数(约1.3)在攻角为90°时获得[11-12]。但是,该数据是通过在流体通道中浸入手/前臂模型的试验方法所获得的,只是对游泳时产生的力的粗略估计。并且,这些试验研究以定常流(固定的流速、攻角和后掠角)为前提假设,忽略了实际游泳中非定常流条件下的涡旋剥离和附加质量效应[7,16-18]。因此,在定常流前提假设下所获得的游泳流体力学特性在非定常流环境中将不再适用。此外,现有条件下,在相对较大的空间内(泳池)对快速且幅度相对较小的活动肢体进行数码拍摄,所获得的图像画幅和清晰度均有不足,降低了数字化运动学测量技术的准确性和可靠性,限制了三维视角下对游泳划水动作循环中肢体运动的测量精度[19-20]。

为了突破这一局限性,研究者采用了计算流体力学(CFD)方法,用数学物理原理求解非定常流环境下游泳的升力和阻力问题,极大程度地扩展了游泳升力和阻力机制假说的发展空间和研究价值。例如,2020年COHEN等[21]以男性优秀自由泳运动员为研究对象,通过对运动员进行激光扫描和多角度视频拍摄,构建游泳的生物力学模型。随后,研究人员模拟模型以单侧呼吸的方式通过虚拟泳池,并利用平滑粒子流体力学(smoothed particle hydrodynamic,SPH)探索动作的不对称性对自由泳运动表现的影响。最终发现,流体动力学的不对称性与泳者的运动学不对称性相关。同时,水流的力和速度在泳者的划水动作周期内波动,其升力和阻力对推力的贡献与泳者手部划水时手掌的攻水角度相关。2022年,张智虎等[22]的研究利用CFD分析了游泳比赛时泳者在相邻泳道存在竞争对手情况下所受到的流体黏性阻力,发现在游泳比赛初始阶段,中间泳道的泳者所受到的流体黏性阻力较小,对其出发加速有利的。而当中间游泳者处于领先时,两侧的对手的游动会增加其所受到的黏性阻力,因此对其途中游不利。但当中间游泳者落后时,两侧的对手的游动会减少其所受到的黏性阻力,有利于追赶。

但是,目前基于 CFD 方法的游泳流体动力学研究绝大多数集中于水生生物,针对竞技游泳的相关研究十分有限。其潜在原因可能在于竞技游泳包含了繁多的比赛项目,涉及不同的泳姿和距离,其过程中又包含了入水、水下滑行、途中游、转身、冲刺等动作特征存在较大差异的阶段,存在高度的复杂性,大幅增加了 CFD 计算过程中边界条件定义的难度,继而显著增加了对计算机算力的要求。

2.2　涡旋能量机制假说

从上世纪 90 年代起,就有学者提出可能存在其他对游泳推进过程贡献巨大的力学机制,并且开展了一些研究初步探索了非定常流体条件下游泳的推进机制。例如,狄建等[23]于 2003 年发表的综述运用了文献资料调研、观察、举证与类比推理等研究方法,结合生物力学和流体力学的例证,解释了人类游泳时肢体与水流的相互作用,论证了泳者划水时所形成的涡流具有动量转换的作用,认为涡流在高速旋转时所释放出的冲量是游泳推进力的重要组成部分,仅以阻力、升力、浮力、重力、惯性力作用解释人类游泳的推进机制是不完整的。

2000 年以前,非定常流体下的游泳推进力的研究因其复杂性而数量有限,并且以描述性的定性研究为主,为数不多的定量研究也主要聚焦在游泳过程中的某些特定阶段,如潜泳过程中的推离阶段或打腿阶段,或针对身体局部的某个动作成分。同时,严格从术语的语义出发并根据相关公式,有关游泳升力和阻力推进机制的研究并不属于非定常流条件下的游泳流体力学分析范畴。学界普遍认为,基于动量、涡度及其相关标量(即泳者在游泳过程中的动能及其游泳动作所产生涡旋的涡度拟能)的研究更加适用于非定常流条件下的游泳流体力学分析[24]。其中,“涡旋理论”已被广泛用于非定常流环境下水生生物、鸟类和昆虫在游动和飞行中的推进特性的量化研究,并已逐渐被应用于人类游泳的推进机制研究。研究发现,在泳者游泳的划水阶段,会产生一个“剥离涡”,表示一次推进的结束[13,25]。可以推测,当泳者手部在水下以曲线轨迹循环往复做划水动作时,会持续释放“剥离涡”,形成涡旋,辅助推进[26]。

涡旋的产生代表了动量的转移,类似于在鱼类的研究中观察到的——涡流所产生的方向向后动量与鱼类所获得的方向向前动量呈对应关系。LAUDER 等[27]于 2002 年的研究发现,和单鳍鱼类推进类似,泳者在水下豚式打腿(dolphin kick)时所产生的推进力大小,取决于打腿动作所产生的涡流面积及其所携带的环流大小。此外 SUGIMOTO[28]的研究利用人体游泳建模分析软件“SWUM (SWimming hUman Model)”分析了豚式打腿时人体各节段所产生的推进力,最终发现,豚式打腿时,推进力主要由足部产生,同时,随着推进力的增加,阻力也同步增大。因此可以认为,豚式打腿所产生的推进力和阻力对泳者在水下的游速而言至关重要,未来的研究应该关注泳者在游泳推进时相关关节的净力矩及其对推进的贡献大小,同时,还应关注不同泳者间的个体差异。

之后,随着流场可视化研究技术的出现和发展,游泳涡旋推进机制的研究进程被大幅向前推进。通过流场可视化技术,研究者可以更加直观地分析流场的运动特性。其中,被广泛应用的流场可视化技术包含了自然(或自发)气泡、簇毛、彩色染料、注入气泡(或气泡墙)、荧光粉、反光悬浮颗粒,以及粒子图像测速和数字粒子图像测速技术等。

其中,粒子图像测速技术(particle image velocimetry,PIV)以及数字粒子图像测速技术(digital particle image velocimetry,DPIV)是近年来新兴发展的流场可视化技术,可以实现对流场运动的简单定量分析,尤其是对非定常流体环境下[29]。该技术通过跟踪中性浮力粒子,生成与流场运动响应的速度矢量图,以量化流场的运动特性[5,27]。PIV 及 DPIV 技术的游泳流场可视化研究原理如图所示(图 1),在试验中,水槽中待测流场内充满了跟随性较好的中性示踪颗粒,示踪颗粒被激光器所产生的强度均匀的片光光源所照亮。当泳者划水游泳时,高速相机在固定的位置,固定的方向,以相同的时间间隔,连续两次对测试区域内的示踪粒子进行曝光,并将图像上传至计算机(图 2)。之后,计算机相关配套分析软件将曝光后的示踪粒子图像划分成细小的判读窗口,通过对相同位置的判读窗口在时间序列上前后两帧示踪粒子图像的互相关运算,得到每个判读窗口内示踪粒子的平均位移,继而定量分析待测区域内流场的运动特性[5]。

在 PIV 及 DPIV 的游泳流场可视化研究试验中,相机的布置有两种不同的架构方式,平移架构可以有效避免透视变形的影响,角位移架构则可获得更大的透视角(图 3)。

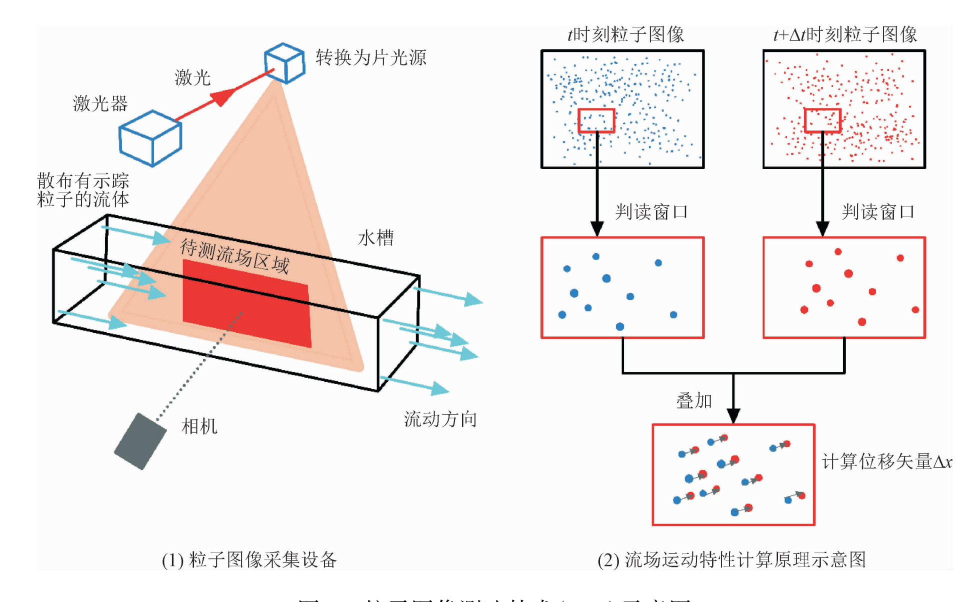


图 1 粒子图像测速技术(PIV)示意图

Fig. 1 Schematic diagram of PIV experiment

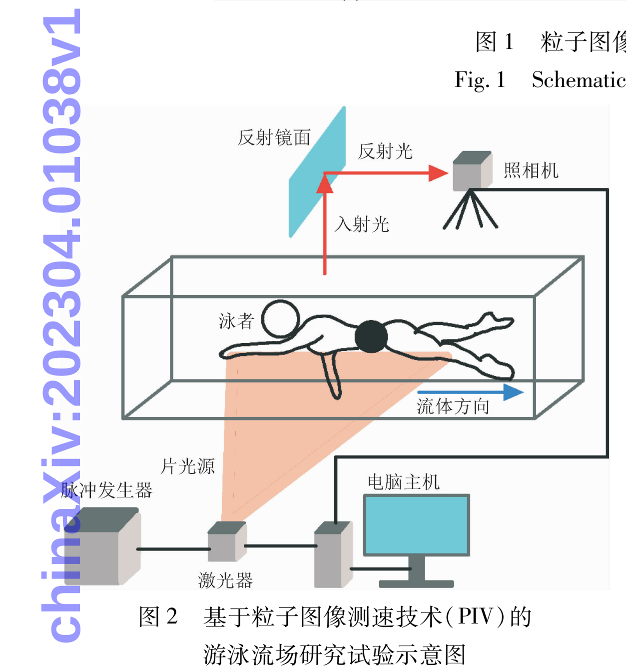


图 2 基于粒子图像测速技术(PIV)的游泳流场研究试验示意图

Fig. 2 The experimental situation of PIV in fluid dynamic analysis of swimming

通过 PIV 或 DPIV 的流畅可视化研究试验,研究者可以得到泳者途中游阶段任一时刻的速度场和涡量场(图 4),并通过相应的计算机软件获得涡量场中涡流的涡量、环流值、涡旋半径等参数,帮助研究者进行相应的流体力学分析。

在先进测量设备的帮助下,非定常流环境中的游泳运动生物力学和流体力学参数的量化研究数量明显增加,带来了许多开创性的成果。比如,FISH[30] 1999 年的研究提出了用"斯特劳哈尔数 (Strouhal number,St) "来量化泳者在水下潜泳阶段采用豚式打腿推进时的能量传递效率,并发现该系数和泳者打腿时,身体的振幅和打腿频率和游速相关,并认为该系数可以代表泳者在豚式打腿时不稳定移动和稳定移动之比。FLORYAN 等[31] 于 2018 年的研究证实了鱼类的斯特劳哈尔数远低于人类,且高水平泳者的斯特劳哈尔数低于新手泳者。

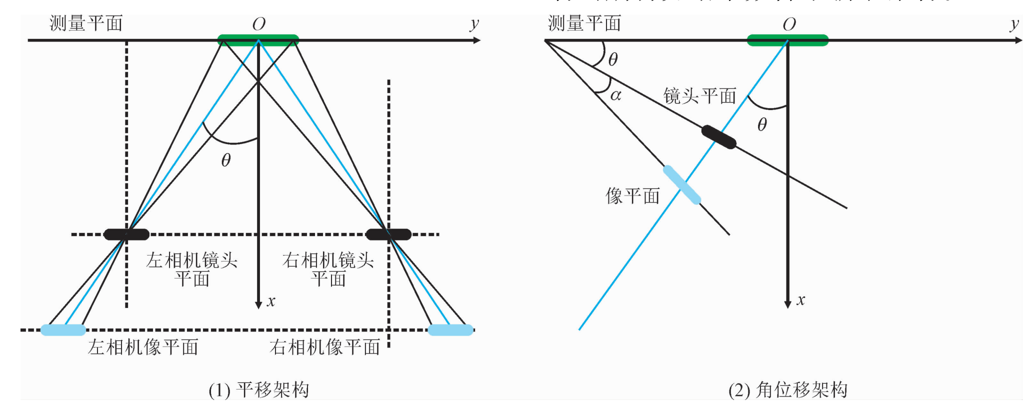
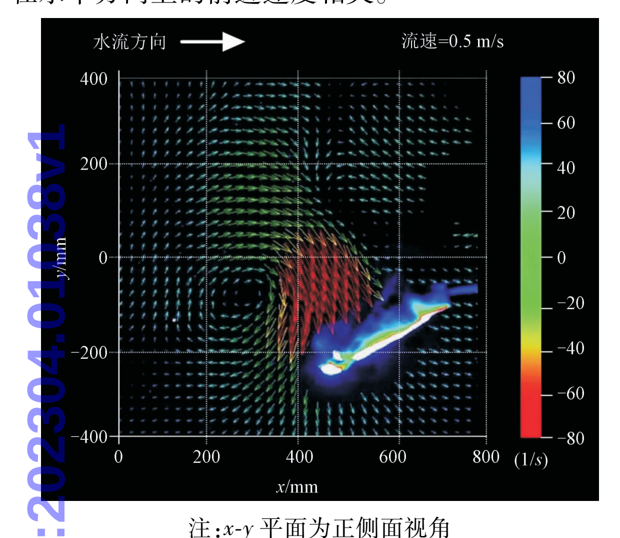


图 3 粒子图像测速技术(PIV)测量流场特征试验的不同相机布置架构

Fig. 3 Position structures of camera in PIV experiment for fluid dynamic analysis of swimming

除此之外,MAGLISCHO[14] 于 2003 年的研究利用傅里叶变换对泳者在水下豚式打腿的过程进行分析后发现,高水平泳者可以利用大约 0.4 m/s 的躯干垂直摆动速度,创造大约 2 m/s 的游速。类似的研究还包括了 GAVIHIN 等[32] 于 2006 年发表的研究,该研究分析了泳者在水下采用豚式打腿潜泳过程中身体波动的频率、振幅和相位特征,发现泳者在水下采用豚式打腿潜泳过程中,下肢从髋关节到踝关节的身体波动以正弦波为基波,能量从髋关节开始传递,髋关节在垂直方向上的"振动速度"和身体在水平方向上的前进速度相关。



注:x-y 平面为正侧面视角

图 4　粒子图像测速技术(PIV)测量自由泳(爬泳)划水时的速度场和涡量场

Fig. 4　Velocity and vorticity fields in PIV experiment for fluid dynamic analysis of crawl style swimming strokes

关于非定常流中手部划水的流体力学分析,BIEWENER 等[33] 于 2018 年的研究通过将人类蛙泳的划水动作和鸟类及昆虫的飞行动作进行对比分析,发现人类在蛙泳时可以和鸟类及昆虫一样,利用先前动作产生的涡旋,获得额外的升力和推进力(鸟类及昆虫飞行时,能在翅膀运动停止的过程中保持升力),该研究同时页验证了 UNGERECHTS 等[34] 于 2006 年的研究中所提出的额外升力和推进力产生的 4 个主要机制——延迟失速,马格纳斯效应,瓦格纳效应,和尾迹重获效应。除此之外,REDONDO 等[35] 的一系列研究利用 PIV 技术分析了鱼类游泳时周围流场的流速和压力之间的关系,发现鱼类可以在水中转向后,利用先前游动产生的涡旋获得额外推进力,这些结果意味着,未来流体力学视角下游泳的运动生物力学研究重点之一将是解决泳者如何在转身后利用先前动作所产生的涡旋以进一步提升游速的问题。

2.3　轴向流(射流)机制假说

轴向流(射流)推进机制假说来源于对单鳍鱼类游泳的流体力学分析,是对涡旋推进机制进一步深入。MATSUUCHI 等[5] 于 2004 年的研究利用 PIV 技术对单鳍鱼类在非定常流环境中游动的流场进行了可视化分析,并发现单鳍鱼类游动产生推进力和升力的机制和鸟类飞行时产生推进力和升力的空气动力学机制类似,单鳍鱼类在水中摆动的尾鳍所产生的延迟失速效应,在其游动的尾迹中形成了一对涡旋(一个卡门涡旋和一个反向涡旋),由于两个涡旋方向相反,涡旋之间产生了和游动方向相反的射流,继而产生推进力和升力(图 5)。

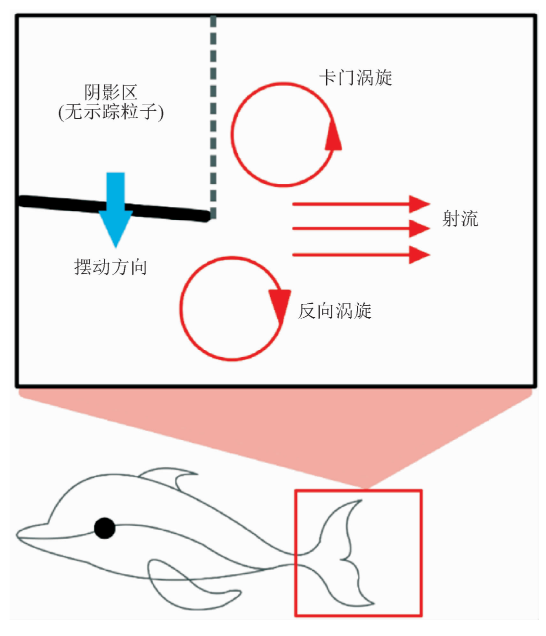


图 5　基于 PIV 技术的单鳍鱼类非定常流射流推进机制示意图

Fig. 5　Schematic diagram of the propulsion produced by an oscillating fin in unsteady flow (through PIV approach)

在该机制假设中,流场中所观测到的涡旋被假设为涡环,其环流值可用以下公式计算

$$\Gamma = \int \omega \mathrm{d}s \tag{1}$$

其中:ω 为涡环的涡量;ds 为涡环的单位面积。因此,涡环诱导速度的大小可以用毕奥-萨伐尔定律计算(The Law of Biot-Savart),即

$$V_0 = \frac{\Gamma}{2R} \tag{2}$$

其中:V_0为涡环诱导速度;Γ 为涡环的环流值;R 为

涡环的半径,该诱导速度的方向符合右手定则。

同时,涡环所携带的动量为

$$M = \rho \cdot 2R \cdot \Gamma \quad (3)$$

其中:ρ 为水的密度;R 为涡环的半径;Γ 为上述涡环的环流值。综上,可以通过将泳者游泳过程中所携带的动量值和根据涡环环流值所推导的动量值进行对比,验证轴向流(射流)推进机制假说。

为了验证该机制假设,KAMATA 等[36] 利用 DPIV 技术分析了人类游泳划水动作的推进机制,发现游泳划水时手部方向的改变也会产生一对方向相反的涡旋,随着手部攻角的增加,涡旋逐渐剥离,继而在中间形成一股射流,形成推进力。同时,该研究试验测得的射流速度和根据涡旋环流所推算的射流速度匹配。因此,可以认为游泳过程中通过手部划水所形成的推进力主要来自于轴向射流。此外,ROUBOA 等[7] 也利用 PIV 流场可视化技术分析了自由泳运动员手部及下肢运动,并且发现,游泳时泳者手部的划水动作和其产生的水下涡旋的运动,以及泳者自身的动量变化存在密切的相关性——泳者划水产生的涡旋半径和所携带的涡量越大,泳者从中获得的前进冲量也越大,即泳者受到了更大的推进力。

在游泳运动中,除了手部划水动作的推进机制和剥离涡旋间的轴向射流有关,泳者在水下潜泳阶段采用豚式打腿时的推进机制也被发现与剥离涡旋间的轴向射流有关。TOUSSAINT 等[16] 于 2002 年初步提出了轴向流(射流)作为自由泳(爬泳)时上肢产生推进力的一种假设。TOUSSAINT 等表示,根据伯努利定律,当靠近肢体流体的局部压力沿指尖的方向减小时,就会形成压力梯度。因此,旋转肢体将流体沿着手臂的前后两侧“泵”向手部,同时,手臂的平移增加了手掌侧(前侧)的压力,继而从较低压力的手背侧(后侧)产生推进力。2005 年,MIWA 等[37] 使用了 DPIV 技术测量了非定常流中海豚式打腿在矢状面的尾迹特征,其结果和上述 MATSUUCHI 等[5] 于 2004 年的研究结果相符,证实了泳者在水下采用豚式打腿潜泳的尾迹中也包含了一对方向相反的涡旋,且涡旋对的预测诱导速度和试验所测涡旋中的射流速度相匹配。

表 1 总结了目前游泳研究中所应用的流场可视化技术及其优缺点。显然,要完全了解泳者在水中推进机制,以及如何提高推进的效率,还需要进一步的研究。

表 1 游泳研究中所应用的流场可视化技术

Tab. 1 Flow visualization methods applied in swimming research

研究方法	相关描述	代表性研究	优点分析	缺点分析
自然(或自发)气泡	气体突然进入水中时产生的自然现象	COLWIN 等 1985[38] COLWIN 等 1992[39] COLWIN 等 1985[40] COLWIN 等 1999[41] COLWIN 等 2002[25] UNGERECHTS 等 1988[42]	对泳池的水质无影响,无吸入风险,安全性高; 可以观察到原始的流体运动状态; 无穿戴设备,对泳者动作无影响; 成本较低,测试方便。	仅能进行简单的定性描述分析; 气泡产生、变化和消失的速度太快,同时变化复杂,难以观察; 受气泡遮挡以及水和气泡对光线折射对观察所造成的影响。
簇毛	观察由一定长度的,特定材质的线或纤维所组成的簇毛的运动特征	HAY 等 1989[43] FERRELL 等 1993[44] TOUSSAINT 等 2000[45] NAKAYAMA 等 1993[46]	可以根据簇毛的方向观察水流的方向; 可以从簇毛的分布疏密推测流体压力的分布和变化; 无穿戴设备,对泳者动作无影响。	影响水质,难以清理; 存在泳者不慎吸入的风险; 仅能进行简单的定性描述分析; 受到气泡遮挡以及水和气泡对光线折射的影响。
反光颗粒	固体示踪剂颗粒在待测区域内均匀分布	ARELLANO 等 1999[47] REDONDO 等 1998[35]	相比于气泡和簇毛,固体颗粒的稳定性更高,且对光线无折射作用,减少了干扰来源; 较好还原流体运动的状态; 无穿戴设备,对泳者动作无影响; 可利用高速摄像机进行连续拍摄,实现准定量分析。	难以清理,可能损坏泳池水循环系统; 存在泳者不慎吸入的风险; 固体颗粒的存在改变了水的流动特性,其流动状态和真实情况相比存在差异; 仅能进行准定量分析; 无法排除颗粒间遮挡以及水对光线折射对观察所产生的影响。
注入气泡(或气泡墙)	流体示踪剂(空气)通过细管或小孔,连续注入待测流体	ARELLANO 等 2001[47] ARELLANO 等 2002[26]	对泳池的水质无影响,无吸入风险,安全性高; 可以观察到原始的流体运动状态; 无穿戴设备,对泳者动作无影响; 成本较低,测试方便; 可根据需求调整注入气泡的大小、数量和疏密程度,相比于自然气泡法,更加便于观察记录。	仅能进行简单的定性描述分析; 气泡产生、变化和消失的速度太快,同时变化复杂,难以观察; 无法排除气泡遮挡以及水和气泡对光线折射对观察所产生的影响。

续表 1

研究方法	相关描述	代表性研究	优点分析	缺点分析
彩色染料	流体示踪剂(干燥粉剂)通过细管或小孔,连续注入待测流体	COLMAN 等 1998[48]	无穿戴设备,对泳者动作无影响; 成本较低,测试方便; 相比于气泡和簇毛,干燥粉剂的稳定性更高,且对光线无折射作用,减少了干扰来源; 较好还原流体运动的状态; 可根据需求调整染料注入的参数,便于观察记录; 可利用高速摄像机进行连续拍摄,实现准定量分析。	影响水质,难以清理; 存在泳者不慎吸入的风险; 仅能进行简单的定性描述分析; 受到水对光线折射的影; 变化复杂且快速,难以观察; 无法排除水对光线折射对观察所产生的影响。
荧光粉	利用来流和粉剂颗粒表面之间的化学反应(荧光反应)	COLMAN 等 2006[49]	相比于气泡和簇毛,荧光粉稳定性更高,且对光线无折射作用,减少了干扰来源; 较好还原流体运动的状态; 无穿戴设备,对泳者动作无影响; 相比于固体反光颗粒,对水流动特性的影响较小; 可利用高速摄像机进行连续拍摄,实现准定量分析。	难以清理,可能损坏泳池水循环系统; 存在泳者不慎吸入的风险; 一定程度上改变了水的流动特性,导致水的流动状态和真实情况相比存在差异; 仅能进行准定量分析; 无法排除水对光线折射对观察所产生的影响。
粒子图像测速技术(PIV)	拍摄流体中示踪粒子的运动进行光学和数学分析	ARELLANO 等 2003[50] MATSUUCHI 等 2004[5]	可以利用计算机流场可视化技术实现对水流速度场和涡量场的定量分析; 可以利用计算机算法修正水流及气泡折射所产生的误差,使分析结果更为精确; 可自定义分析时段和水流速度,实现对不同阶段及游速下流场的定量分析。	在特制的测试水槽中进行,泳者动作可能和真实训练或比赛有差异; 难以还原真实泳池中的水况,尤其是相邻泳道中存在竞争对手的情况; 由于设备空间限制,分析仅限途中游阶段,无法对转身和出发阶段进行流场可视化分析。 设备昂贵,测试成本高。

3 游泳的阻力

泳者在游泳过程中所受到的与运动方向相反的力即游泳的阻力。TOUSSAINT[45] 于 2000 年的研究指出,泳者在水中匀速游泳时所受的总阻力等于“摩擦阻力”(F_{fr})、“压差阻力”(F_p)和“兴波阻力”(F_w)的总和。

$$F_{tot} = F_{fr} + F_p + F_w \tag{4}$$

3.1 摩擦阻力

摩擦阻力的估算公式为

$$F_{fr} = \mu\left(\frac{dV}{dZ}\right)S_{fr} \tag{5}$$

其中:μ 是流体动力黏滞系数;dV 是水流层之间的流速差;dZ 是水流层之间的厚度差;S_{fr}是人体在水中的浸润表面积[51-52]。

摩擦阻力的大小取决于泳者的总浸入面积,以及泳者身体和流体之间边界层的流场条件。边界层流场可以是层流、湍流以及层流和湍流之间的过渡状态,具体取决于水流的速度,泳者肢体的大小和形状,以及水的密度和黏度。在层流中,流体在平流层中流动,层与层之间没有任何干扰或破坏。随着流速的增加,流体开始剥离边界层并形成湍流,使阻力增加。除此之外,边界层内的摩擦增大也会使流体从边界层剥离并产生湍流。流体从边界层剥离后,剥离点后方水的压力和流速发生变化,最终形成涡流。对于水中给定形状的物体,剥离点的位置与雷诺数(Re)有关,雷诺数是流体惯性力与黏性力的无量纲,即

$$Re = \rho VL/\mu \tag{6}$$

其中:ρ 是流体密度;V 是流速;L 是物体长度;μ 是流体动力黏滞系数。

竞技游泳的 Re 大约在 2×10^5 与 2.5×10^6 之间。因此,考虑到人体形状和大小,可以推断游泳运动中的水流主要是湍流。在这种情况下,摩擦阻力相对于压差阻力和兴波阻力而言较小。

3.2 压差阻力

压差阻力的估算公式为

$$F_p = \frac{1}{2}C_p\rho AV_0^2 \tag{7}$$

其中:C_p 是压差阻力系数,受到水中物体形状和水流方向的影响;ρ 是流体密度;A 是物体在流体方向上的投影面积;V 是物体和流体的相对速度。

竞技游泳的目标是尽可能提升游泳的速度。但是,由于压差阻力和泳者游速的平方呈正相关关系,因此可以推断,泳者的游速无法随着其划水速率或力量的增加而无线增大,即泳者游泳过程中可能存在一个"最大游速"。SANDERS 等[53]于 2008 年发表的研究验证了该推断,该研究中,泳者被要求在划水时手部相对于手臂不产生运动,仅用肩关节推动身体。同时,SCHLEIHAUF[54]利用主动阻力测量系统(measurement of active drag system, MAD-System)测量泳者游泳时的推进力,结果发现,泳者游泳速度无法随着其向后划水的速度增加而无限增加。

实际游泳过程中,泳者为了减少压差阻力通常一方面使身体尽可能保持流线型,以减小压差阻力系数,另一方面使身体尽可能地保持水平,以减小整个身体相对于水流的横截面积。但是,由于人类身体由许多节段组成,泳者很难在主动游泳过程中时刻保持身体良好的流线型姿势。同时,由于泳者在游泳过程中身体的大幅度运动,也很难始终保持绝对的水平姿态。因此,局部的压差阻力是难以避免的。2020 年,ZAMPARO 等[55]发表的文献综述进一步强调了不同泳姿、年龄、性别、技术水平的泳者之间的压差阻力差异。

3.3 兴波阻力

兴波阻力是泳者在水面上时,由于船体掀起波浪,即船行波,产生与船舶前进方向相反的阻力,这就是兴波阻力是游泳过程中泳者身体把水"推开"时所受到的阻力。兴波阻力和流体密度以及游泳方向有关,其估算公式为

$$F_w = \rho\left(\frac{A_0^3}{\lambda^2}\right)(V_w \sin\alpha)^3 \cos\alpha \Delta t \tag{8}$$

其中:ρ 是流体密度;A_0 是波浪振幅;λ 是波浪波长;V_w 是波速;α 是泳者质心(COM)位移方向矢量和主波传导方向的夹角。

先前研究发现,当游泳速度接近最大值时,在水面或较浅的深度游泳时(常见于途中游阶段)所产生的兴波阻力在总阻力中占比很大,且和泳者的动能损失成正比。VENNEL 等[56]于 2006 年的研究发现,兴波阻力主要受游泳深度的影响,且在深度大于 0.6 m 后可以忽略不计。因此,可以推断,兴波阻力可以通过在水下潜泳来最小化,尤其是在出发和转身后,泳者可以在一个较深的水下位置达到理想的途中游速度。

关于游泳中的兴波阻力最重要的发现是,在水面或较浅的深度游泳的人体和在水面上航行的船只一样,由于排水所产生的浪的波长随着游速的增加而增加,当波长接近泳者身高时(船则为吃水线长度),泳者继续加速会非常吃力。这表示即者达到了自身游泳的"船体速度(hull speed)"。

根据流体力学原理,游泳的速度和泳者身高之间的关系可以用一个无量纲数"弗劳德数(Froude number)"来定义,弗劳德数的大小决定了兴波阻力的大小,并可根据以下公式计算,即

$$Fr = v/\sqrt{gH} \tag{9}$$

其中:v 是游泳速度;H 是泳者身高;g 是重力加速度(9.8 m/s^2)。

研究发现,高水平中长距离自由泳比赛中,游泳运动员的游速接近于自身的船体速度,而在短程冲刺的游泳项目比赛中,游泳运动员的游速会超过其自身船体速度。因此,在短程冲刺的游泳项目比赛中,运动员会花费更多的体力让身体尽可能越过浪峰,以达到更高的速度,即"爬浪"[57-58]。

除此之外,不同的游速下,兴波阻力在总阻力中的占比差异较大,变化范围从 5% 到 60% 不等[16,52,59]。

3.4 游泳的减阻措施及相关研究进展

由于非定常流条件下游泳流体力学研究的发展,基于动量、涡度及其标量指标的采集和分析,逐渐成为了游泳减阻研究的重点领域。例如,ARELLANO 等[13]于 2006 年发表的研究发现,泳者尾迹中涡旋所携带的动量和涡量的均方差平衡,反应了泳者在水中所受的阻力,研究还发现,当涡度最小值、最大动量和最小机械能消耗三者相结合时,泳者所受到的推进力和阻力的合力最大,表示动作的推进效果最好。

近年来,运动生物力学和仿生力学的学科交叉也为游泳减阻方面研究带来了新的启示。例如,2022 年 ZHANG 等[60]的研究发现,河豚表皮上的黏液流变特性为黏弹性,可以在其游动过程中形成滑动面,减小了河豚和水之间的摩擦阻力。该发现可以为游泳装备,如泳衣、泳帽、泳裤等的减阻设计带来新的启发。与此同时,2022 年,MASUD 等[61]对企

鹅水下潜泳的流体动力学特征进行了研究，并且提出了利用斯特劳哈尔数和雷诺数的乘积来评估泳者水下潜泳的能力，为竞技游泳的科学化训练提供了帮助。

随着计算机科学前沿成果越来越多被应用于游泳运动生物力学和流体力学研究，基于传统研究方法的游泳流体力学研究在人工智能和机器学习的帮助下，实现了从庞大的流体流动数据库中提取数据，成功建立了比传统数学模型更稳健和精确的学习模型。流体力学和计算机科学的融合，创造了一个强大而复杂的新研究领域，有助于变革流体力学在游泳运动生物力学研究中的应用[62]。例如，OHGI[63]于 2006 年发表的研究利用动态时间规整算法（dynamic time warping，DTW），研究了不同水平泳者在不同速度下划水动作的相似性，并展望了该算法应用于游泳流体力学参数分析的可能性。

4　推进力和阻力相互作用

推进力和阻力在游泳时每次划水动作周期的不同阶段以及每次划水动作间均有不同且不断发生变化，继而导致了游泳时泳者身体质心的速度在一个划水周期内也会发生波动。同时，游泳过程中推进力和阻力的变化过程并不是相互独立的，两者之间存在较大的相关性。所以，以目前的研究手段，推进力和阻力的具体大小难以被分别确定，研究者往往通过研究观察它们在泳者身上的合力的差异所带来的影响，来研究游泳推进力和阻力的相互作用。TAKAGI 等[64]于 2004 年的研究发现，精英运动员比亚精英运动员的速度波动更小，其原因可能是精英运动员可以更有效地减少阻力。早期基于二维平面分析的研究证据支持了这一观点，认为游泳速度越快，髋或全身质心速度的速度波动越小[65-67]。因此可以推测，在单次划水动作中泳者的最大速度越高，其承受的阻力就越大。PSYCHARAKIS 等[68]于 2006 年发表的研究部分证实了该推测，该研究的三维运动学数据显示，实际上，自由泳（爬泳）快的泳者比慢的泳者倾向于有更大的速度波动。同时，该研究比较了单次划水动作中极短时间窗口内速度的局部极小值，并发现在划水动作循环的前段，泳者说受到的阻力已远大于推进力。

除此之外，考虑到目前存在的不同推进机制假说以及不同的阻力来源，单独讨论推进力和阻力的影响因素也是较为困难的。因此，研究人员通过探索不同因素对泳者游泳运动表现和能量代谢的影响，来推测和深入分析这些因素对游泳流体力学机制的影响。例如，根据压差阻力公式可知，泳者在水中的身体流线型姿态变化会影响压差阻力的大小，因此，游泳过程中呼吸和换气时身体姿态的变化可能对游泳运动表现产生负面影响。PEDERSEN 等[69]于 2006 年的研究发现，在游泳冲刺阶段泳者呼吸和划水频率增加但是每划前进距离减少，并且在 20 m 的短程冲刺训练中，无呼吸策略的运动表现和 1 次呼吸策略的运动表现无显著性差异，但每次划水均呼吸的策略会使冲刺表现显著下降，因此该研究建议在 100 m 以内的冲刺项目中，呼吸次数越少越好，但 100 m 及以上距离的项目中，两次呼吸之间的划水次数不要超过 3 次。上述结果意味着，呼吸固然对泳者在游泳过程中的能量供应十分重要，但呼吸动作本身及其所包含的身体轴向旋转（翻滚）——会破坏身体的流线型姿态，带来额外的压差阻力。

然而，更大的阻力并非意味着更差的运动表现。PAYTON 等[70]于 2002 年的计算机仿真研究发现，游泳过程中身体在纵轴上的翻滚可能有助于产生推进用升力。YANAI[71]于 2004 年的研究发现，高水平游泳运动员能有效地利用浮力来驱动身体的纵向翻滚。上述证据表明，未来的研究需要通过识别翻转动作对推进力和阻力的具体贡献，来探索翻转对游泳运动表现的影响。

最后，基于游泳是一种非常依赖于节奏的运动，游泳过程中的肢体协调和动作时机其底层逻辑也是源于流体力学考量。SOULTANAKIS 等[72]于 2015 年的研究分析了自由泳（爬泳）时游速、划水动作周期和平均推进力之间的关系，并且发现三者之间呈一定的非线性正相关关系。考虑到高水平泳者可以利用延迟失速效应获得更大的推进力[6]，可以推测，优秀的泳者可以通过调整其划水（或打腿）的频率、肢体的相对位置以及产生动作的时机，“抓取”更多的水，产生更大的涡旋，从而给身体提供更大的前进冲量。换言之，泳者动作的运动学和动力学均会对其游动过程中的流体力学特征产生影响，该影响可以是积极的，也可以是负面的，取决于泳者的技术、经验和静态天赋（如身体形态学特征）。

在研究方法层面，目前主要采用直接和间接方法来测量游泳过程中的主动阻力。同时，也有研究

通过使用特制的测量设备,如手部压力传感器,来测量手部所产生的推进力[73]。但是,这些方法并不能完全避免测量对泳者正常游泳动作的干扰。在未来的研究中,可以通过结合三维生物力学分析、能量代谢评估、或生理指标评估,更高效地识别单个划水动作周期中泳者所受的合力及其对泳者运动表现的影响。要做到这一点,研究可以使用三维分析方法对泳者身体的质量分布进行量化,建立数字化模型。同时,水上和水下的拍摄需要至少两个机位,尤其是水下视图,应多多益善。但是,由于水中气泡的干扰和水的蓝色滤波效应,目前而言,对泳者水下动作的自动数字化记录依然存在技术难点,实现目标所需的工作依然艰巨。

5 结 语

本研究从流体力学视角出发,对流体力学视角下游泳动力学相关研究及其发展历程进行了简单梳理。所提及的流体力学相关因素对游泳运动表现的实际影响归纳于表 2。

目前而言,对竞技游泳中泳者周围非定常流场的三维运动特性及其力学效应分析是游泳运动生物力学研究的全新领域,可以为竞技游泳的运动生物力学分析带来全新的认识。随着新型测量设备的出现,如激光测试系统、粒子图像测速系统、光纤和光纤镜等,越来越多的高科技实验设备被运用于游泳的运动生物力学和流体力学研究,极大的推动了游泳中非定常流场三维运动特性的量化研究,对游泳减阻和技术优化策略的制定提供了重要的科学参考和依据。

然而,流体力学视角下的竞技游泳运动生物力学研究在数量上尚待积累,但已有的成果依然喜人,虽然离实现"让泳者利用游泳过程中的流体力学效应,消耗最少的能量,获得最大的前进动量,产生最大推进效应"的最终目标仍有一定距离,但现有的相关研究已经证明,该目标在理论上是完全可行的。未来的研究应聚焦游泳流体力学基于流场可视化技术应用下的量化分析,并将研究结果和人体运动生物力学更紧密结合。

表 2 影响游泳运动表现的相关因素及其潜在流体力学机制

Tab. 2 Factors affecting swimming performance and their potential hydrodynamic mechanism

分类	影响因素	受影响因素	流体力学机制
客观因素	身体形态学	阻力	1. 根据公式(5),相同身高下,身体瘦削的泳者在水下浸润表面积更小,摩擦阻力相对较小; 2. 根据公式(7),身体瘦高型的泳者流线型较好,因此压差阻力系数较小,有利于减少压差阻力; 3. 根据公式(7),身体瘦高型的泳者水平面横截面积相对较小,游泳过程中相对于水流的投影面积较小,有利于减少压差阻力; 4. 根据公式(9)和(8),泳者身高影响其"船体速度",继而影响其兴波阻力大小。
		推进力	根据公式(1)和(3),手掌面积较大的泳者可以在划水过程中"抓取"更多的水,从而产生面积和涡量更大的涡旋,获得更多的前进冲量。
	水温	阻力	水的流体动力粘滞系数随水温升高而减小,根据公式(5),摩擦阻力减小。
	水质	阻力	漂白剂和消毒剂等添加剂会增加水的密度,根据公式(7)和(8),会影响压差阻力和兴波阻力
主观因素	游泳技术	阻力	不恰当的游泳技术会破坏涡量场,形成湍流,增加额外的阻力。
		推进力	1. 良好的游泳技术可以帮助泳者"抓取"更多的水,从而产生面积和涡量更大的涡旋,获得更多的前进冲量; 2. 良好的游泳技术可以帮助泳者利用相关流体力学效应获得额外的升力和推进力。如高水平泳者在水下转身后通过控制身体的深度、流线型姿态以及打腿时机,重获转身前划水产生的涡旋尾迹,利用尾迹重获效应,产生额外的推进力。
	比赛策略	阻力	1. 根据公式(7),泳者在出发或转身后的水下阶段尽可能地让身体保持流线型,从而减少压差阻力,延缓水下潜泳阶段地游速下降,使其进入途中游阶段时可以获得更大的初速度; 2. 短程项目中,泳者在预赛阶段通过战术调整,以在决赛中获得尽量靠近中间的道次,从而减少决赛出发过程中的粘性阻力,获得加速优势; 3. 短程项目中,泳者花费更多的体力让身体尽可能越过浪峰,缩短吃水线长度,减小兴波阻力,从而达到更高的游速。
		推进力	1. 泳者在冲刺阶段增加身体的动作幅度和划水频率,以牺牲减阻和每划距离为代价,获取更大的推进力; 2. 中长距离项目中,高水平泳者除了争取靠中间的泳道以获得阻力优势外,还通过保持和相邻泳道内对手的相对位置(先后和深度),避免受到对手所产生涡旋或湍流的影响。

参考文献：

[1] 张跃,李建设,杨红春,等. 孙杨备战伦敦奥运会转身技术改进与优化的生物力学研究[J]. 体育科学,2013,33(9):85-90.
ZHANG Yue,LI Jianshe,YANG Hongchun,et al. A biomechanical study for optimizing SUN Yang's turning technique during the preparation of London Olympic Games[J]. China sport science,2013,33(9):85-90(in Chinese).

[2] 林洪,阎超,何枫,等. 游泳运动技术优化与创新的研究[J]. 体育科学,2006,26(4):40-57.
LIN Hong,YAN Chao,HE Feng,et al. Study on optimization and innovation of swimming technique[J]. China sport science,2006,26(4):40-57(in Chinese).

[3] 李建设,王章明,李蜀东,等. 中国游泳"浙江经验"及美国游泳长盛不衰之探究[J]. 体育科学,2019,39(1):27-34.
LI Jianshe, WANG Zhangming, LI Shudong, et al. The study of "Zhejiang experience" in Chinese swimming and generational success of American swimming[J]. China sport science,2019,39(1):27-34(in Chinese).

[4] ZHENG K L. Research on the physiological monitoring and evaluation of pre-competition altitude training for Zhejiang elite swimmers [J]. Physical activity and health,2021,5(1):64-70.

[5] MATSUUCHI K,MIWA T,NOMURA T,et al. Unsteady flow measurement around human hand in swimming using PIV[C]//9th Annual Congress European College of Sport Science. Clermont-Ferrand:[s. n.],2004.

[6] MATSUUCHI K,YAMADA K,NOMURA T,et al. Motion analysis of front crawl swimmer's hand and visualization of flow fields using PIV[J]. Transactions of the Japan society of mechanical engineers series B,2007,73(734):2027-2032.

[7] ROUBOA A,SILVA A,LEAL L,et al. The effect of swimmer's hand/forearm acceleration on propulsive forces generation using computational fluid dynamics[J]. Journal of biomechanics,2006,39(7):1239-1248.

[8] 李天赠,黄丹. 基于计算流体力学的游泳动态数值模拟研究进展[J]. 中国体育科技,2019,55(2):19-28.
LI Tianzeng,HUANG Dan. Progress in numerical simulation of human swimming motions based on computational fluid dynamics[J]. China sport science and technology,2019,55(2):19-28(in Chinese).

[9] 张晓侠,马吉光. CFD 仿真技术在游泳运动力学问题研究中的应用[J]. 体育科学,2013,33(7):70-75.
ZHANG Xiaoxia,MA Jiguang. Development and application of CFD simulating technology in swimming dynamics[J]. China sport science,2013,33(7):70-75(in Chinese).

[10] LI M,GRAHAM J. Rule changes in water polo-history,FINA 2018 new rules,and literature review[J]. The open sports sciences journal,2021,14:82-85.

[11] 小施雷哈夫 R E,吴奇三. 游泳推进力的流体力学分析(续)[J]. 江苏体育科技,1981(5):40-47.
SCHLEIHAUF R E JR, WU Qisan. A hydrodynamic analysis of swimming propulsion (continue)[J]. Sports and Science,1981(5):40-47(in Chinese).

[12] 小施雷哈夫 R E,吴奇三. 游泳推进力的流体力学分析[J]. 江苏体育科技,1981(4):6-9.
SCHLEIHAUF R E JR, WU Qisan. A hydrodynamic analysis of swimming propulsion[J]. Sports and Science,1981(4):6-9(in Chinese).

[13] ARELLANO R. Understanding swimming propulsion based on new technologies[M]. New York:Routledge,2006.

[14] MAGLISCHO E W. Swimming fastest[M]. Champaign:Human Kinetics,2003.

[15] SANDERS R H. Hydrodynamic characteristics of a swimmer's hand [J]. Journal of applied biomechanics,1999,15(1):3-26.

[16] TOUSSAINT H M,VAN DEN BERG C,BEEK W J. "Pumped-up propulsion" during front crawl swimming[J]. Medicine & science in sports & exercise,2002,34(2):314-319.

[17] GARDANO P,DABNICHKI P. On hydrodynamics of drag and lift of the human arm[J]. Journal of biomechanics,2006,39(15):2767-2773.

[18] LAUDER M A,DABNICHKI P. Estimating propulsive forces—sink or swim? [J]. Journal of biomechanics, 2005, 38(10):1984-1990.

[19] KWON Y H,CASEBOLT J B. Effects of light refraction on the accuracy of camera calibration and reconstruction in underwater motion analysis[J]. Sports biomechanics,2006,5(2):315-340.

[20] LAUDER M A,DABNICHKI P,BARTLETT R M. Improved accuracy and reliability of sweepback angle,pitch angle and hand velocity calculations in swimming[J]. Journal of biomechanics,2001,34(1):31-39.

[21] COHEN R C Z,CLEARY P W,MASON B R,et al. Studying the effects of asymmetry on freestyle swimming using smoothed particle hydrodynamics[J]. Computer methods in biomechanics and biomedical engineering,2020,23(7):271-284.

[22] 张智虎,郑明刚,曲诚. 基于 CFD 的游泳比赛粘性阻力分析[J]. 建模与仿真,2022,11(3):797-809.
ZHANG Zhihu,ZHENG Minggang,QU Cheng. The analysis of adhesive resistance in swimming competition based on CFD[J]. Modeling and simulation,2022,11(3):797-809(in Chinese).

[23] 狄建,杨萍. 涡流成因与能量转换对游泳推进力贡献的探讨与分析[J]. 中国体育科技,2003,39(2):45-48.
DI Jian,YANG Ping. The discussion and analysis on whirlpool formation and energy conversion for contributing to swimming propulsion[J]. China sport science and technology,2003,39(2):45-48(in Chinese).

[24] ARELLANO R,TERRÉS-NICOLI J M,REDONDO J M. Fundamental hydrodynamics of swimming propulsion[J]. Portuguese journal of sport sciences,2006,6(S2):15-20.

[25] COLWIN C. Breakthrough swimming[M]. Champaign:Human Kinetics,2002.

[26] ARELLANO R,PARDILLO S,GAVILÁN A. Underwater undulatory swimming:Kinematic characteristics,vortex generation and ap-

plication during the start, turn and swimming strokes[C]//Proceedings of the 23rd International Symposium on Biomechanics in Sports. [S. l.]:[s. n.],2002:2941.

[27] LAUDER G V, DRUCKER E G. Forces, fishes, and fluids: Hydrodynamic mechanisms of aquatic locomotion[J]. Physiology, 2002, 17(6):235-240.

[28] SUGIMOTO S. Estimation of thrusts generated by each body part during underwater dolphin kick using "SWUM"[J]. Biomechanics and medicine in swimming X, 2006(6):25-34.

[29] 闫凯伦,郭新宇,夏振炎. 基于非均匀查询窗口 PIV 技术的湍流边界层特性实验研究[J]. 应用力学学报,2021,38(4):1293-1300.
YAN Kailun, GUO Xinyu, XIA Zhenyan. The experimental study on the characteristics of turbulent boundary layer based on the PIV technology of non-uniform interrogation window[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2021, 38(4):1293-1300(in Chinese).

[30] FISH F E. Review of dolphin hydrodynamics and swimming performance[M]. San Diego: SSC San Diego, 1999.

[31] FLORYAN D, VAN BUREN T, SMITS A J. Efficient cruising for swimming and flying animals is dictated by fluid drag[J]. Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America, 2018, 115(32):8116-8118.

[32] GAVIHIN A, ARELLANO R, SANDERS R. Underwater undulatory swimming: Study of frequency, amplitude and phase characteristics of the 'body wave'[M]//Biomechanics and Medicine in Swimming X. Porto: Porto Faculdade de Desporto da Universidade do Porto, 2006:35-37.

[33] BIEWENER A A, PATEK S. Animal locomotion[M]. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2018:12-52.

[34] UNGERECHTS B E, KLAUCK J. Consequences of unsteady flow effects for functional attribution of swimming strokes[M]//Biomechanics and Medicine in Swimming X. Porto: Faculdade de Desporto da Universidade do Porto, 2006:109-111.

[35] REDONDO J M, ARELLANO R. Flow visualization using reflective particles in analytical movements of the hand in water: A pilot study [M]//Barcelona: Escuela Técnica Superior De Canales Y Puertos, 1998:89-108.

[36] KAMATA E, MIWA T, MATSUUCHI K, et al. Analysis of sculling propulsion mechanism using two-components particle image velocimetry[M]//Biomechanics and Medicine in Swimming X. Porto: Faculdade de Desporto da Universidade do Porto, 2006:50-52.

[37] MIWA T, MATSUUCHI K, SAKAKIBARA J, et al. Visualization of dolphin-kicking wake using 3C-PIV method[C]//In 10th Annual Congress of the European College of Sport Science. [S. l.]:[s. n.], 2005.

[38] COLWIN C. Essential fluid dynamics of swimming propulsion[J]. ASCA newsletter, 1985(4):22-27.

[39] COLWIN C. Swimming into the 21st century[M]. Champaign: Leisure Press, 1992:5-88.

[40] COLWIN C. Practical application of flow analysis as a coaching tool [J]. American swimming coaches association magazine, 1985(5): 5-8.

[41] COLWIN C. Swimming dynamics: Winning techniques and strategies[M]. Carrollton: Masters Press, 1999:33-65.

[42] UNGERECHTS B E. The relation of peak body acceleration to phases of movements in swimming[M]//Swimming Science V. Champaign: Human Kinetics Books, 1988:61-66.

[43] HAY J G, THAYER A M. Flow visualization of competitive swimming techniques: The tufts method[J]. Journal of biomechanics, 1989, 22(1):11-17, 19.

[44] FERRELL M D, HENDRICK J L, MCGINNIS P M. An analysis of the Bernoulli Lift Effect as a propulsive component of swimming strokes[J]. Journal of biomechanics, 1993, 26(3):307.

[45] TOUSSAINT M H. An alternative fluid dynamic explanation for propulsion in front crawl swimming[C]//Applied Proceedings of the XVIII International Symposium on Biomechanics in Sport-Swimming. [S. l.]:[s. n.], 2000:39-46.

[46] The Visualization Society of Japan. Fantasy of flow: The world of fluid captured in photographs[M]. Amsterdam: IOS Press, 1993: 20-90.

[47] ARELLANO R, PARDILLO S. Teaching hydrodynamic concepts related to swimming propulsion using flow visualization techniques in the swimming pool[C]//The Fifth National Symposium on Teaching Biomechanics in Sports. [S. l.]:[s. n.], 2001:56.

[48] COLMAN V, PERSYN U, UNGERECHTS B. A mass of water added to the swimmer's mass to estimate the velocity in dolphin-like swimming below the water surface[C]//In VIII International Symposium-Biomechanics and Medicine in Swimming-Programme and Abstracts. [S. l.]:[s. n.], 1998:49.

[49] COLMAN V, MARTENS J, SOONS B, et al. Experimenting with varios styles to optimize the performance per crawl event[M]//Biomechanics and Medicine in Swimming X. Porto: Faculdade de Desporto da Universidade do Porto, 2006:214-216.

[50] ARELLANO R. Computer science applied to competitive swimming: Analysis of swimming performance and fluid mechanics[J]. International journal of computer science in sport, 2003, 2:9-19.

[51] VORONTSOV A R, RUMYANTSEV V A. Propulsive forces in swimming[M]//Biomechanics in Sport: Performance, Enhancement And Injury Prevention. New York: John Wiley & Sons, Ltd., 2000:205-231.

[52] VORONTSOV A R, RUMYANTSEV V A. Resistive forces in swimming chapter 9[M]// Biomechanics in Sport: Performance, Enhancement And Injury Prevention. Oxford: Blackwell Science Ltd., 2000.

[53] SANDERS R, PSYCHARAKIS S, NAEMI R, et al. Advancing swimming science with CARE[C]//5th International Scientific Conference on Kinesiology. Zagreb: University of Zagreb, 2008: 81-89.

[54] SCHLEIHAUF R E. Biomechanics of human movement [M]. Bloomington: Authorhouse, 2004:1-106.

[55] ZAMPARO P, CORTESI M, GATTA G. The energy cost of swimming and its determinants[J]. European journal of applied physiol-

ogy,2020,120(1):41-66.

[56] VENNELL R,PEASE D,WILSON B. Wave drag on human swimmers[J]. Journal of biomechanics,2006,39(4):664-671.

[57] MORAIS J E,BARBOSA T M,NEIVA H P,et al. Young swimmers' classification based on performance and biomechanical determinants: Determining similarities through cluster analysis[J]. Motor control,2022,26(3):396-411.

[58] MULLEN G J. Swimming science: Optimizing training and performance[M]. Chicago: University of Chicago Press,2018.

[59] WILSON B,THORP R. Active drag in swimming[M]//Biomechanics and Medicine in Swimming IX. Saint-Etienne: University of Saint-Etienne,2003:15-20.

[60] ZHANG Yaosheng,FENG Xiaoming,TIAN Guizhong,et al. Rheological properties and drag reduction performance of puffer epidermal mucus[J]. ACS biomaterials science & engineering,2022,8(2):460-469.

[61] MASUD M H,LA MANTIA M,DABNICHKI P. Estimate of Strouhal and Reynolds numbers for swimming penguins[J]. Journal of avian biology,2022,2022(2):e02886.

[62] RAZDAN S,SHAH S. Optimization of fluid modeling and flow control processes using machine learning: A brief review[C]//Advances in Mechanical Engineering and Material Science. Singapore: Springer Nature Singapore,2022:63-85.

[63] OHGI Y. Pattern matching application for the swimming stroke recognition[M]//Biomechanics and Medicine in Swimming X. Porto: Faculdade de Desporto da Universidade do Porto,2006:69-70.

[64] TAKAGI H,SUGIMOTO S,NISHIJIMA N,et al. Swimming: Differences in stroke phases,arm-leg coordination and velocity fluctuation due to event, gender and performance level in breaststroke[J]. Sports biomechanics,2004,3(1):15-27.

[65] TOGASHI T,NOMURA T. A biomechanical analysis of the novice swimmer using the butterfly stroke[M]//Biomechanics and Medicine in Swimming. Swimming Science VI. London: E & FN Spon,1992:87-92.

[66] SANDERS R H. Some aspects of butterfly technique of New Zealand Pan Pacific squad swimmers[M]//Biomechanics and Medicine in Swimming VII. London: E & FN Spon,1996:23-28.

[67] SANDERS R H. Breaststroke technique variations among New Zealand Pan Pacific squad swimmers[M]//Biomechanics and Medicine in Swimming VII. London: E & FN Spon,1996:64-69.

[68] PSYCHARAKIS S G. A three-dimensional analysis of intra-cycle kinematics during 200m freestyle swimming[J]. Edinburgh: The University of Edinburgh,2006.

[69] PEDERSEN T,KJENDLIE P L. The effect of breathing action on velocity in front crawl swimming[M]//Biomechanics and Medicine in Swimming X. Porto: Faculdade de Desporto da Universidade do Porto,2006:75-77.

[70] PAYTON C,BALTZOPOULOS V,BARTLETT R. Contributions of rotations of the trunk and upper extremity to hand velocity during front crawl swimming[J]. Journal of applied biomechanics,2002,18(3):243-256.

[71] YANAI T. Stroke frequency in front crawl: Its mechanical link to the fluid forces required in non-propulsive directions[J]. Journal of biomechanics,2003,36(1):53-62.

[72] SOULTANAKIS H N,NAFPAKTIITOU D,MANDALOUFA S M. Impact of cool and warm water immersion on 50-m sprint performance and lactate recovery in swimmers[J]. The journal of sports medicine and physical fitness,2015,55(4):267-272.

[73] TAKAGI H,WILSON B. Calculating hydrodynamic force by using pressure differences in swimming[M]//Biomechanics and Medicine in Swimming VIII. Jyväskylä: University of Jyväskylä,1999:101-106.

（编辑　黄崇亚　张璐）